

ШВЫРКОВ Сергей Александрович
Доктор технических наук, доцент
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия
E-mail: pbtp@mail.ru

ПУЗАЧ Сергей Викторович
Доктор технических наук, профессор
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия
E-mail: puzachsv@mail.ru

ГОРЯЧЕВ Станислав Анатольевич
Кандидат технических наук, доцент
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия
E-mail: zqstas@gmail.com

ШВЫРКОВ Александр Сергеевич
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия
E-mail: ginspire1301@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ПРОРЫВА ПРИ РАЗРУШЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ ОБЪЁМОМ ДО 30 000 М³ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Показана возможность использования лабораторно-экспериментального метода исследования для решения комплекса вопросов, связанных с нахождением оптимальных геометрических параметров различных по конфигурации ограждений для предупреждения распространения пожара пролива при разрушении типовых резервуаров номинальным объёмом до 30 000 м³.

Ключевые слова: лабораторное моделирование, резервуар, разрушение, волна прорыва, критерии подобия.

В работе [1] представлен разработанный специалистами кафедры пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России лабораторный стенд для исследования параметров волны прорыва, образующейся при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара (РВС), а также воздействия волны прорыва на ограждения различного конструктивного исполнения, в том числе на защитную стенку резервуаров типа «стакан в стакане» (РВСЗС). При этом основное внимание было уделено описанию условий гидродинамического подобия исследуемого процесса, конструкции лабораторного стендса и обработке полученных экспериментальных данных с оценкой чисел Фруда и Рейнольдса на соответствующих участках движения потока, показавших их удовлетворительную сходимость с данными, полученными при обработке материалов натурного эксперимента по разрушению РВС-700 м³ с водой [2].

При решении задач с использованием лабораторно-экспериментального метода исследований, связанных с нахождением оптимальных геометрических параметров различных по конфигурации ограждений для РВС и РВСЗС и их устойчивостью к воздействию волны прорыва, требуется моделирование потока жидкости при квазимгновенном разрушении наиболее широко распространённых на объектах нефтегазовой отрасли резервуаров номинальным объёмом до 30 000 м³. С учётом поставленной цели на разработанном лабораторном стенде (рис. 1) были проведены дополнительные опыты с оценкой параметров потока при разрушении модельного резервуара, выполненного в масштабе 1:130 (пределный для данной конструк-

ции стенда масштаб) по отношению к натурному РВС-30 000 м³.

Исходный модельный резервуар имеет диаметр $d_p = 0,35$ м и высоту $h_p = 0,30$ м и жёстко закреплён на направляющих стенда, поэтому при моделировании натурного резервуара типа РВС-30000 м³ с сохранением базового диаметра ($d_p = 0,35$ м) соблюдение условия геометрического подобия обеспечивали соответствующим уровнем жидкости в моделируемом резервуаре.

В соответствии с требованиями ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия» рекомендуемые геометрические параметры для типового РВС-30 000 м³ составляют: внутренний диаметр 45,6 м; высота стенки 18,0 м. С учётом максимального заполнения резервуара на 95 % уровень жидкости в нём составит 17,1 м. Тогда в выбранном масштабе 1:130 уровень жидкости в модельном резервуаре составит 0,132 м.



Рисунок 1. Общий вид лабораторного стенда с модельным резервуаром и защитной стенкой

Поскольку в исследуемых процессах, связанных с образованием и движением волн прорыва при разрушении резервуара, главную роль играют силы тяжести (критерий Фруда, Fr), то должно обеспечиваться соблюдение равенства критерия Фруда в соответствующих точках потоков по трассе растекания [3–6]:

$$Fr = \frac{U_h^2}{g_h H_h} = \frac{u_m^2}{g_m h_m}, \quad (1)$$

где U_h, u_m – характерная скорость волны прорыва при разрушении резервуара, м/с; H_h, h_m – характерная высота волны прорыва при разрушении резервуара, м; $g_h = g_m$ – ускорение свободного падения, м/с² (здесь и далее индексы « h » и « m » показывают отношение величины соответственно к натуре и модели).

Другим необходимым условием моделирования является соблюдение турбулентности потоков как на натурном объекте, так и в модели, то есть $Re_m > Re_{kp}$ (здесь Re_m – критерий Рейнольдса в модели; Re_{kp} – критическое значение критерия Рейнольдса при моделировании открытых потоков, принимаемое, как правило, не менее 10^4 [6, 7]):

$$Re_m = \frac{u_m h_m}{v_m}, \quad (2)$$

где v_m – кинематическая вязкость жидкости (в данном случае для воды при 20 °C – $1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с [8]).

Вследствие того что процесс движения волны прорыва при разрушении резервуара представляет собой быстроизменяющееся неустановившееся движение жидкости, то необходимо соблюдение также тождественности критерия Струхала (критерия гомохронности) [3–6]:

$$Sh = \frac{U_h T_h}{H_h} = \frac{u_m t_m}{h_m}, \quad (3)$$

где T_h, t_m – характерное время процесса, с.

Помимо указанных выше условий, влияние поверхностного натяжения должно быть настолько малым, чтобы оно не препятствовало образованию волн, в связи с чем скорость потока со свободной поверхностью на модели должна быть более 0,23 м/с [3].

В целях проверки выполнения рассмотренных выше условий гидродинамического подобия наряду с лабораторными исследованиями, описание которых приводится ниже, было выполнено численное моделирование процесса разрушения натурного РВС-30 000 м³ с водой в программном комплексе для инженерных расчётов LSDYNA. Подробное описание модели, в основе которой лежит численное решение систем уравнений гидродинамики и уравнений деформируемого твёрдого тела в связанной пространственной постановке, представлено, в частности, в работах [9, 10]. На рисунке 2 приведены характерные фрагменты течения жидкости при моделировании

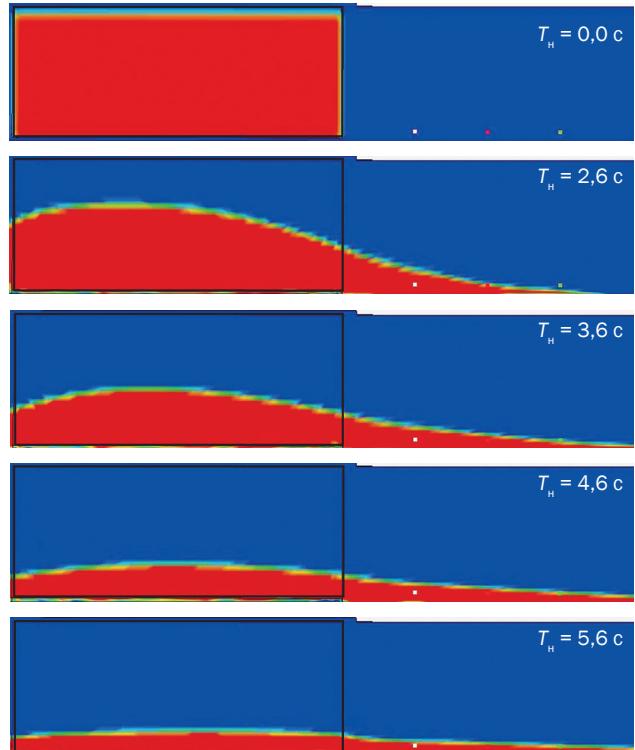


Рисунок 2. Характерные фрагменты течения жидкости при моделировании процесса разрушения РВС-30 000 м³

процесса разрушения рассматриваемого типа резервуара, при этом фиксация основных параметров потока (H_h, U_h) в определённый момент времени от начала разрушения резервуара (T_h) проводилась соответственно на расстояниях $L_h = 10, 15, 20, 25$ и 30 м по трассе растекания от стенки резервуара на постоянной высоте в 1,3 м от нулевой отметки (табл. 1).

Таблица 1

Результаты численного моделирования параметров потока при разрушении РВС-30 000 м³
и оценки критериев подобия

$L_h, \text{м}$	$T_h, \text{с}$	$H_h, \text{м}$	$U_h, \text{м/с}$	Fr_h	Sh_h
10	2,60	3,00	12,20	5,06	10,57
	3,60	2,60	10,80	4,57	14,95
15	3,10	2,20	12,90	7,71	18,18
	4,10	2,00	11,60	6,86	23,78
20	4,70	1,80	12,40	8,71	32,38
	5,70	1,40	10,20	7,58	41,53
25	4,60	1,50	12,60	10,79	38,64
	5,60	1,35	11,60	10,16	48,12
30	4,50	1,30	13,00	13,25	45,00
	5,50	1,20	11,40	11,04	52,25



Рисунок 3. Общий вид участка стенда перед проведением опытов по оценке высоты потока в соответствующие моменты времени на расстояниях l_m

Для сравнительного анализа критериев подобия была выполнена серия лабораторных исследований параметров потока при разрушении модельного резервуара в масштабе 1:130. Методика проведения экспериментов первой серии опытов по оценке высоты потока заключалась в следующем. На основании лабораторного стенда, выполненного из листового алюминия толщиной 0,01 м, непосредственно от стеки модельного резервуара по трассе растекания потока обустраивалась вертикальная стенка, конструктивно выполненная из листового алюминия высотой 0,3 м и длиной 0,5 м. Стенка имела толщину 0,0005 м, что не препятствовало при проведении опытов прохождению вдоль неё потока. Для фиксации высоты потока в соответствующие моменты времени на стенку предварительно была нанесена миллиметровая разметка с выделенными участками на расстояниях $l_m = 0,077; 0,115; 0,154; 0,192$ и $0,231$ м, соответствующих в выбранном масштабе моделирования расстояниям L_h , а также первоначальным уровням жидкости в модельном резервуаре, равным 0,132 м (рис. 3).

Далее с помощью кнопки плавного спуска (см. рис. 1) модель резервуара с пневматическим поршнем, давление в котором создавалось воздушным компрессором, прижимали к основанию лабораторного стенда с уплотнительным резиновым кольцом, обеспечивая герметичность системы. Резервуар заполняли водой до требуемого уровня, предварительно установив внутри его обечайки вкладыш для имитации квазигновенного разрушения внутреннего резервуара. Вкладыш представляет собой свёрнутый в цилиндр и вставленный внутрь обечайки лист поликарбоната толщиной 0,0006 м и высотой 0,132 м, который при заполнении резервуара водой плотно прижимается к его обечайке по всей образующей. При нажатии кнопки резкого подъёма (см. рис. 1) с помощью пневматического поршня происходило быстрое поднятие обечайки модельного резервуара. Освобождённый вкладыш под действием напора воды свободно раскрывался на 180°, имитируя разрушение резервуара по вертикальному шву. Образовавшийся поток жидкости свободно растекался по основанию лабораторного стенда (рис. 4).

Процесс образования и распространения потока по трассе растекания регистрировался цифровой фотокамерой марки Nikon 1J1, создающей 5-секундные видеоролики с замедленной съёмкой формата HVGA 640×240/400 кадров в секунду. Полная раскадровка видеороликов позволяла устанавливать начальный кадр разрушения модельного резервуара с образованием волны прорыва, а также фиксацию количества кадров при прохождении потоком соответствующих участков по трассе растекания l_m , что в конечном счёте давало возможность оценивать высоту волны h_m в любой момент времени t_m изучаемого процесса.

Важно отметить, что время от момента разрушения модельного резервуара до снижения уровня жидкости на основании лабораторного стенда в зоне возможной его инструментальной оценки (более 0,005 м) не превышало 0,5 с.



$t_m = 0,228$ с ($T_h = 2,6$ с)



$t_m = 0,316$ с ($T_h = 3,6$ с)



$t_m = 0,404$ с ($T_h = 4,6$ с)



$t_m = 0,491$ с ($T_h = 5,6$ с)

Рисунок 4. Характерные фрагменты течения жидкости при разрушении модельного резервуара

Поэтому для оценки местной скорости потока использование приборного оборудования, например, микровертушки или трубы Пито с дифференциальным манометром, практически не представляется возможным. Данные обстоятельства обусловлены, во-первых, особенностями изучаемого процесса: быстроизменяющееся неустановившееся движение с растеканием на открытой поверхности, в данном случае по основанию лабораторного стенда. Во-вторых, конструктивными особенностями этих приборов. Так, использование гидрометрической микровертушки позволяет определять только среднюю скорость в потоке за определённый промежуток времени, как правило, превышающий 1 с. Время же отклика цифровых дифференциальных манометров, используемых в современных модификациях трубок Пито для измерений местной скорости, превышает 0,5 с. Таким образом, в настоящих опытах для измерения местной скорости на соответствующих участках трассы растекания потока использовалась специально изготовленная динамическая трубка Пито, представляющая собой Г-образную трубку, конструктивно выполненную из органического стекла наружным диаметром 0,007 м и толщиной стенки 0,001 м. Вертикальная часть трубы имела высоту 0,3 м, а участок трубы, загнутый под углом 90°, имел длину 0,07 м.

Вычисление скорости в месте установки трубы производилось по формуле [3]

$$u_{tp} = K \sqrt{2gH_{tp}}, \quad (4)$$

где K – коэффициент, зависящий от вязкости жидкости и конструктивных особенностей трубы и определяемый при тарировании трубы; H_{tp} – скоростной напор, определяемый по уровню жидкости в трубке от поверхности потока, м.

В целях нахождения коэффициента K была выполнена тарировка изготовленной трубы посредством сравнения результатов измерений средней скорости потока, выполненных соответственно трубкой и имеющейся в наличии тарированной гидрометрической микровертушкой цифровой модернизированной (ГМЦМ) типа «МИКРО-01». На рисунке 5 показан общий вид изготовленной трубы Пито и гидрометрической микровертушки.

Измерение скорости жидкости проводилось на участке трубопровода длиной 1 м и диаметром 0,05 м. С одной стороны трубопровода была установлена заглушка, а в верхней его части смонтирован шаровой Г-образный кран, подключённый к системе центрального водоснабжения. Посредством плавного открывания крана в трубопровод подавалась вода, создавая поток глубиной $h_{tp} = 0,010; 0,015; 0,020$ и $0,025$ м соответственно.

Свободно вытекающая с другой стороны трубопровода вода попадала в приёмный лоток и далее в систему канализации. В верхней центральной части корпуса трубопровода заранее было выполнено окошко размером $0,1 \times 0,03$ м, куда поочерёдно в центр создаваемого потока устанавливались микровертушка и трубка.

Принцип действия датчика ГМЦМ основан на электролитическом способе формирования импульсов. Между двумя электродами, погруженными в водный поток, вращается лопастной винт, изменяя электрическое сопротивление цепи. Импульсы напряжения подаются в регистрирующее устройство для обработки. Регистрирующее устройство состояло из блока формирования импульсов, блока задания коэффициентов градуировочного уравнения, тактового генератора, блока управления и вычисления, блока счёта и дешифрации, блока индикации. Регистрирующее устройство было специально адаптировано

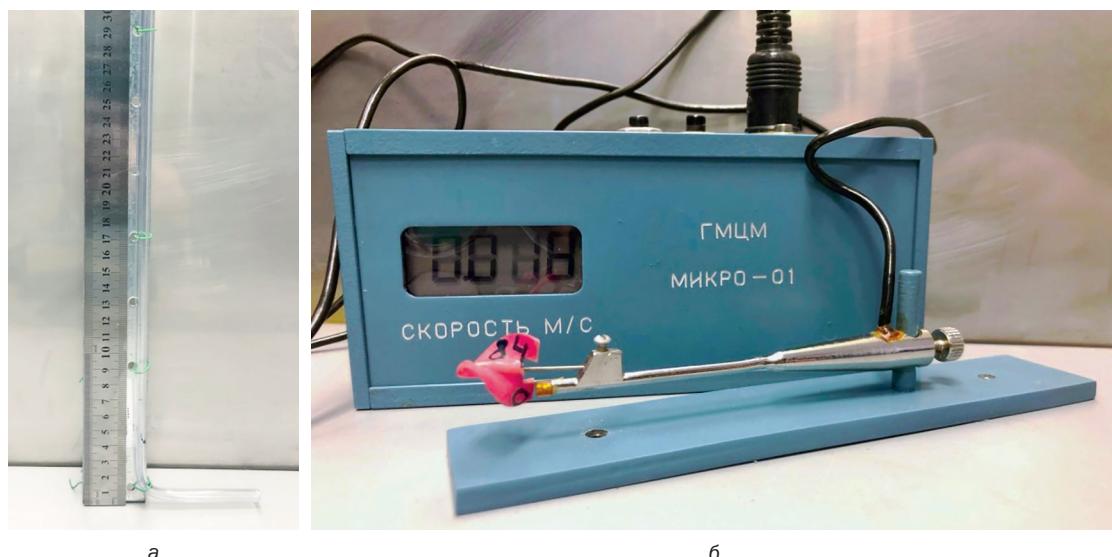


Рисунок 5. Общий вид трубы Пито (а) и гидрометрической микровертушки (б)
для измерения скорости потока жидкости в лабораторных условиях

Таблица 2

Результаты измерений средней скорости потока в трубе микровертушкой и трубкой

h_{tp} , м	Измерения ГМЦМ		Измерения трубкой		$K = u_{ГМЦМ} / u_{tp}$	u_{tp} , м/с**, по формуле (4)
	N , об.	$u_{ГМЦМ}$, м/с, по формуле (5)	H_{tp} , м	u_{tp} , м/с*, по формуле (4)		
0,10	18	0,357	0,007	0,371	0,963	0,360
0,015	22	0,432	0,010	0,443	0,976	0,431
0,020	42	0,810	0,035	0,829	0,978	0,805
0,025	51	0,981	0,52	1,010	0,971	0,982
Среднее значение					0,972	—

* Без учёта K ; ** с учётом $K = 0,972$.

к условиям проводимых экспериментов. Принимая во внимание номер используемого лопастного винта (№ 84), а также градуировочный штекер, соответствующий времени осреднения (2 с), использовалась следующая формула для определения средней скорости потока:

$$u_{ГМЦМ} = 0,0378n + 0,0166, \quad (5)$$

где $n = N/\Delta T$, N – показания цифрового индикатора регистрирующего прибора (число импульсов); $\Delta T = 2,0$ с – время осреднения.

В таблице 2 представлены результаты измерений средней скорости потока в трубе соответственно микровертушкой и трубкой, а также вычисленный тарировочный коэффициент K .

Методика проведения экспериментов во второй серии опытов по оценке местной скорости потока тарированной трубкой в целом аналогична методике оценки высоты потока, описанной выше. При этом

вместо стенки по трассе растекания потока на соответствующих расстояниях l_m от стенки модельного резервуара при неизменной высоте в 0,01 м (1,3 м для натурного резервуара) устанавливалась трубка. Процесс также снимался цифровой фотокамерой. Полная раскадровка видеороликов позволяла устанавливать начальный кадр разрушения модельного резервуара с образованием волны прорыва, а также фиксацию в соответствующий момент времени значения скоростного напора на соответствующих участках потока. На рисунке 6 представлены характерные фрагменты измерений трубкой скоростного напора на соответствующих участках по трассе растекания потока при разрушении модельного резервуара.

Далее, используя формулу (4), находили соответствующую местную скорость потока. В таблице 3 представлены результаты обработки экспериментальных данных, а также численные значения соответствующих критериев подобия.

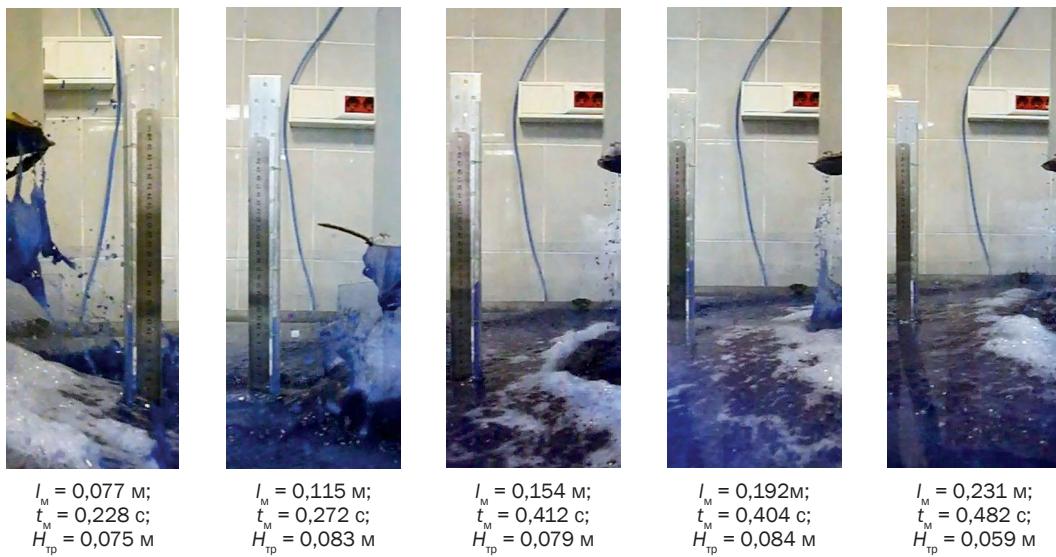


Рисунок 6. Характерные фрагменты измерений трубкой скоростного напора на соответствующих участках по трассе растекания потока

Таблица 3

Результаты экспериментального определения параметров потока при разрушении модельного резервуара и оценки критериев подобия

L_m , м	t_m , с	h_m , м	u_m , м/с	Fr_m	Sh_m
0,077	0,228	0,025	1,179	5,64	10,70
	0,316	0,24	1,103	5,26	14,78
0,115	0,272	0,019	1,241	8,32	17,89
	0,360	0,017	1,153	7,84	23,99
0,154	0,412	0,016	1,212	9,53	31,80
	0,500	0,014	1,090	8,57	38,55
0,192	0,404	0,013	1,246	12,58	39,99
	0,491	0,012	1,175	12,09	49,62
0,231	0,395	0,011	1,226	13,93	43,99
	0,482	0,009	1,050	11,92	53,72

Таблица 4

Сравнительный анализ критериев гидродинамического подобия потоков

Численные значения				Экспериментальные данные				
L_h , м	T_h , с	Fr_h	Sh_h	L_m , м	t_m , с	Fr_m	Sh_m	Re_m
10	2,60	5,06	10,57	0,077	0,228	5,64	10,70	29 646
	3,60	4,57	14,95		0,316	5,26	14,78	25 998
15	3,10	7,71	18,18	0,115	0,272	8,32	17,89	23 393
	4,10	6,86	23,78		0,360	7,84	23,99	19 928
20	4,70	8,71	32,38	0,154	0,412	9,53	31,80	19 046
	5,70	7,58	41,53		0,500	8,57	38,55	15 422
25	4,60	10,79	38,64	0,192	0,404	12,58	39,99	15 661
	5,60	10,16	48,12		0,491	12,09	49,62	13 658
30	4,50	13,25	45,00	0,231	0,395	13,93	43,99	13 486
	5,50	11,04	52,25		0,482	11,92	53,72	9 899

ЛИТЕРАТУРА

- Швырков С. А., Горячев С. А., Воробьев В. В., Швырков А. С. Лабораторное моделирование волны прорыва при разрушении резервуара типа «стакан в стакане» // Технологии техносферной безопасности. 2017. Вып. 2 (72). 8 с. <http://agsp-2006.narod.ru/ttb/2017-2/23-02-17.ttb.pdf> (дата обращения 04.03.2019).
- Швырков С. А., Горячев С. А., Швырков А. Н., Прохоров Ю. П., Воробьев В. В., Батманов С. В. Прогнозирование площади разлива нефтепродукта при квазимгновенном разрушении резервуара // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2005. Вып. 7. С. 8–12.
- Полтавцев В. И., Спицын И. П., Винников С. Д. Гидрологическое лабораторное моделирование. Учебное пособие / под ред. В. И. Полтавцева. Л.: Ленинградский политехн. ин-т, 1982. 143 с.
- Ляйтхер В. М., Прудовский А. М. Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
- Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия, 1967. 235 с.
- Михалев М. А. Физическое моделирование гидравлических явлений. Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 443 с.
- Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.
- Справочник по гидравлическим расчётам/ под ред. П. Г. Киселёва. 5-е изд. М.: Энергия, 1974. 313 с.
- Богач А. А., Муземнек А. Ю., Швырков С. А. Определение гидродинамических нагрузок воздействия волны прорыва, образующейся при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара (PBC), на ограждающую стенку // Сборник трудов шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH/ под ред. А. С. Шадского. М.: Полигон-пресс, 2006. С. 48–54.
- Швырков С. А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара. Монография. М.: Академия ГПС МЧС России. 2015. 289 с.

Материал поступил в редакцию 4 марта 2019 года.

Сравнительный анализ критериев подобия, полученных в результате обработки данных при численном моделировании процесса разрушения РВС-30 000 м³ (натурный объект) и при лабораторных исследованиях на модели рассматриваемого резервуара в масштабе 1:130, представлен в таблице 4.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы. Во-первых, из данных, приведённых в таблице 4, видно равенство чисел Фруда ($Fr_m \approx Fr_h = idem$). Следовательно, скоростные характеристики потока, образующегося при разрушении модельного резервуара, являются подобными потоку, образующемуся при разрушении соответствующего натурного резервуара. Во-вторых, во всех рассмотренных случаях числа Рейнольдса (в рассматриваемом диапазоне изменения параметров потока на лабораторном стенде) более критического значения ($Re_m > Re_{kp} = 10 000$), то есть модельный поток, как и натурный, находится в турбулентном состоянии. В-третьих, во всех рассмотренных случаях обеспечивается тождественность критерия Струхала, то есть соблюдается постоянство протекания анализируемых процессов во времени.

В-четвёртых, вследствие того, что скорость потока воды при проведении лабораторных опытов не менее чем в 4,5 раза превышала критическое значение (0,23 м/с), то можно утверждать о несущественном влиянии на процесс сил поверхностного натяжения, то есть условие волнообразования соблюдается и нет необходимости в увеличении масштаба модели исследуемого резервуара.

Таким образом, соблюдение рассмотренных критериев подобия и условий моделирования позволяет сделать общий вывод о том, что изучаемый процесс находится в автомодельной области, а разработанный лабораторный стенд можно использовать для нахождения оптимальных геометрических параметров различных по конфигурации ограждений для РВС и РВСЗС, а также для анализа их устойчивости к воздействию волны прорыва, образующейся при разрушении типовых резервуаров номинальным объёмом от 700 до 30 000 м³.

Sergei SHVYRKOV

Grand Doctor in Engineering, Associate Professor
 State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
 E-mail: pbtp@mail.ru

Sergei PUZACH

Grand Doctor in Engineering, Professor
 State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
 E-mail: puzachsv@mail.ru

Stanislav GORYACHEV

Ph.D. in Engineering, Associate Professor
 State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
 E-mail: zqstas@gmail.com

Aleksander SHVYRKOV

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia
 E-mail: ginspire1301@gmail.com

RESEARCH OF BREAKOUT WAVE PARAMETERS AT DESTRUCTION OF TANKS WITH A CAPACITY UP TO 30 000 M³ IN EXPERIMENTAL CONDITIONS

ABSTRACT

Purpose. The possibility of using the laboratory-experimental method of the research to solve the problems associated with finding the optimal geometric parameters of different configuration enclosures to prevent the spillage fire spread at destruction of typical tanks with a nominal capacity up to 30 000 m³.

The object of the study is the process of formation and propagation of the breakout wave formed at the complete tank destruction. The subject of the study is the time-varying speed and height of the wave along the spreading path necessary to determine the appropriate similarity parameters.

Methods. Numerical simulation of the destruction process of a full-scale vertical steel tank with water is carried out in the software complex LSDYNA based on the solution of hydrodynamics equations systems and the deformed solid in the associated spatial formulation. The experimental studies are carried out on the first developed laboratory stand with a model tank on a scale of 1:130 to the full-scale tank. During the stand developing conditions of using similarity laws and hydraulic modeling rules are observed, and during the experiments the measuring equipment was applied which was widely used in hydraulic laboratories.

Findings. The result of the research shows that the process studied in laboratory conditions is in the self-similar field (the equality of Froude numbers; the identity of the Strouhal criterion; Reynolds numbers on the model of more critical value; the condition of wave generation is observed).

Research application field. The laboratory stand can be used to find the optimal geometric parameters of different configuration enclosures for tanks, as well as analyze their resistance to the impact of the breakout wave formed during destruction of typical tanks with a nominal capacity from 700 to 30 000 m³.

Conclusions. The possibility of using the laboratory-experimental method of research for finding the optimal geometric parameters of different configuration enclosures to prevent cascade fire development in tank farms of oil and oil products storage facilities due to the complete destruction of tanks with a nominal capacity up to 30 000 m³.

Key words: experimental simulation, tank, destruction, breakout wave, similarity parameters.

REFERENCES

1. Shvyrkov S.A., Goryachev S.A., Vorobyev V.V., Shvyrkov A.S. Laboratory simulation of wave breakthrough at destruction of the tank type "glass in the glass". *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti: internet-zhurnal*, 2017, no. 2 (72), available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/23-02-17.ttb.pdf> (accessed March 2, 2019). (in Russ.).
2. Shvyrkov S.A., Goryachev S.A., Shvyrkov A.N., Prohorov Yu.P., Vorobyev V.V., Batmanov S.V. Forecasting the oil spill area when quasimundo the destruction of the oil tank. *Transport i hranenie nefteproduktov*, 2005, no. 7 pp. 8-12. (in Russ.).
3. Poltavtsev V.I., Spitsyn I.P., Vinnikov S.D. *Gidrologicheskoe laboratornoe modelirovanie* [Hydrological laboratory modeling]. Leningrad, Leningrad Polytechnic University Publ., 1982. 142 p.
4. Lyatkher V.M., Prudovskiy A.M. *Gidravlicheskie modelirovaniye* [Hydraulic modeling]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 392 p.
5. Levi I.I. *Modelirovaniye gidravlicheskikh yavleniy* [Modeling of hydraulic phenomena]. Leningrad, Energia Publ., 1967. 235 p.
6. Mikhalev M.A. *Fizicheskoe modelirovaniye gidravlicheskikh yavleniy* [Physical modeling of hydraulic phenomena]. Saint Petersburg, Izdat. Polytechnic University Publ., 2010. 443 p.
7. Chou V. T. *Gidravlika otkrytykh kanalov* [Hydraulics of open channels]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1969. 464 p.
8. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook of hydraulic calculations]. Ed. by Kiselev P.G.]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 313p.
9. Bogach A.A., Muyzemnek A.Yu., Shvyrkov S.A. *Opredelenie gidrodinamicheskikh nagruzok vozdeystviya volny proryva, obrazujushcheysha pri kvazimnovennom razrushenii vertikalnogo stalnogo rezervuara (RVS), na ogranichayushchuyu stenu*. Sbornik trudov shestoy konferentsii polzovateley programmnogo obespecheniya CAD-FEM GmbH [Determination of hydrodynamic loads of the impact of a breakthrough wave, when is formed during the quasimundo destruction of vertical steel tank (RVS) on the enclosing wall. Collection materials of the sixth Conference of the users of the software of CAD-FEM GmbH]. Moscow, Poligon-press Publ., 2006, pp. 48-54. (in Russ.).
10. Shvyrkov S.A. *Pozharnyy risk pri kvazimnovennom razrushenii neftyanogo rezervuara* [Fire risk when quasimundo the destruction of the oil tank]. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia Publ., 2015. 289 p.